

## ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ, ИЗОБРАЖЕНИЙ И РЕЧИ

УДК 004.932.4

В.В. Старовойтов

**МЕТОДИКА ВЫБОРА ФИЛЬТРА ДЛЯ СГЛАЖИВАНИЯ СПЕКЛ-ШУМА РАДАРНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ**

*Предлагается методика сравнения результатов фильтрации радарных изображений с синтезированной апертурой разными типами фильтров. С ее помощью можно выбирать фильтры, которые лучше других сглаживают исследуемое изображение. Методика базируется на оценке параметра ENL, который, в отличие от известных подходов, вычисляется для автоматически выбираемых участков изображения.*

**Введение**

Метод радиолокационного синтеза апертуры (РСА) позволяет получать радарные изображения земной поверхности и находящихся на ней объектов независимо от метеорологических условий и уровня солнечного освещения. Однако в силу особенностей получения таких изображений [1, 2] возникает специфический шум, который называется спекл-шумом. Он отсутствует на космических изображениях, полученных системами пассивной регистрации отраженных волн в оптическом и тепловом диапазонах.

В геоинформационных системах (например, в пакете ArcGIS) для фильтрации радарных изображений с синтезированной апертурой чаще всего используются фильтр Ли, улучшенный фильтр Ли, фильтр Фроста, фильтр Куана [3–6]. Эти фильтры сохраняют края и детали объектов, сокращая зернистость изображения. Как правило, их применяют локально, в окрестностях  $3 \times 3$ ,  $5 \times 5$ ,  $7 \times 7$ ,  $9 \times 9$  и  $11 \times 11$  пикселей. Кроме этих фильтров для сглаживания изображений данного типа используются нелинейные ранговые фильтры, например медианные. Выбор того или иного типа фильтра предоставляется пользователю, однако сделать его непросто по двум причинам:

- данные о яркости в цифровых радарных изображениях имеют диапазон значений [0–65 535], а на мониторе компьютера отображаются не более 256 оттенков;
- размеры современных синтезированных радарных изображений огромны.

Например, немецкий спутник TerraSAR-X выполняет съемку поверхности Земли в X-диапазоне со средней длиной волны 31 мм в прожекторном режиме с разрешением 1–2 м, размером кадра  $(5–10) \times 10$  км и шириной полосы обзора от 463 до 622 км. Одно из использованных в наших исследованиях цифровых изображений этого спутника имело размер  $27\,083 \times 43\,750$  пикселей и диапазон значений яркости 16 битов/пиксел. Максимальное разрешение современных мониторов (например, WHUXGA) равно  $7680 \times 4800$  пикселей. Таким образом, для визуального анализа исходного и преобразованного радарных изображений их следует преобразовать в новую шкалу значений яркостей и уменьшить в несколько раз либо просматривать по фрагментам.

В настоящее время методика автоматического выбора фильтра для радарных изображений с синтезированной апертурой в литературе не описана.

**1. Модель спекл-шума**

Мультипликативная модель шума применяется, когда полезный сигнал умножается на случайный сигнал. Спекл-шум при синтезе апертуры образуется в результате когерентной суперпозиции пространственно-случайных колебаний отраженного сигнала от разных источников рассеяния. Рассеянные волны накладываются друг на друга, вызывая тем самым появление спекл-шума на изображении, который увеличивает средний уровень серого в локальной окрестности пиксела.

Спекл-шум во всех сканирующих системах с когерентным формированием изображения вызван энергетическими помехами из-за беспорядочно распределенных отражателей сигнала, слишком мелких для того, чтобы их могла отобразить система. Он относится к классу шумов, зависящих от самого сигнала изображения, для объектов с низким разрешением обычно является мультипликативным. Спекл-шум возникает при получении цифровых изображений с помощью ультразвуковых медицинских сканеров и радаров, в результате изображение выглядит «зернистым», а на радарных изображениях появляется крестообразное повышение яркости вокруг некоторого объекта или его границ. Примеры изображений приведены в следующем разделе.

Теоретическая модель РСА-изображений, использующая экспоненциальную плотность распределения вероятности для описания мультипликативного шума, впервые была предложена Годманом [2]:

$$P_{Y/X}(y/x) = (L^L / (x^L \Gamma(L))) \times y^{L-1} e^{-Ly/x},$$

где  $Y$  – регистрируемое изображение;

$X$  – неискаженное изображение;

$\Gamma(L)$  – гамма-функция;

$L$  – число обзоров одного и того же участка поверхности Земли; если  $L=1$ , то  $\Gamma(L)=1$ .

Если в пределах некоторой окрестности оригинальное изображение  $X$  не изменяется, т. е.  $E(X) = const$  (где  $E$  – символ математического ожидания), то плотность распределения вероятности отраженного излучения совпадает с плотностью распределения вероятности спекл-шума  $Z$ . Таким образом, если случайный процесс  $Z$  нормализован, т. е.  $E(Z)=1$ , то для спекл-шума имеем модель

$$P_Z(z) = (L^L / \Gamma(L)) \times z^{L-1} e^{-Lz}.$$

В итоге после нормализации выражения эффект добавления спекл-шума на изображении может быть описан мультипликативной моделью с помощью следующей формулы:

$$Y(i, j) = X(i, j) \times Z(i, j),$$

где  $(i, j)$  – координаты пиксела.

Кроме того, в радарных изображениях сигнал и шум статистически независимы друг от друга. Выборочное среднее и дисперсия одного пиксела равны среднему и дисперсии локальной окрестности с центром в этом пикселе.

## 2. Переквантование радарных изображений для отображения на мониторе

Для визуального анализа результатов обработки изображений рассматриваемого типа необходимо выполнить переквантование исходного диапазона уровней яркости в меньший диапазон [0–255].

Анализ гистограммы (рис. 1) показывает, что около 10,7 % пикселей имеют яркость, превышающую значение 240; около 9,2 % имеют яркость выше значения 255, которое является максимальным значением при восьмибитном представлении полутоновых изображений. Максимальное значение яркости данного изображения равняется 32 767.

Было исследовано несколько вариантов переквантования значений яркости. При равномерном (линейном) переквантовании яркостей из диапазона [0–65536] в диапазон [0–255] получается очень темное изображение с небольшими яркими вкраплениями, поскольку темные значения (0, 1, 2 и 3 соответственно) получают большинство оттенков яркости из основного диапазона [0–1023]. Визуально пиксели с такими значениями яркости на мониторе выглядят черными. В итоге изображение выглядит черным с вкраплениями отдельных светлых точек.

К полученному изображению применялось линейное растяжение контраста с отбрасыванием небольшого процента (около одного) самых темных и светлых пикселей. В итоге контраст изображения был существенно повышен, но светлые пиксели со значениями яркости, близкими к максимальным, в результате такого преобразования практически сливаются, а именно они

показывают отражение от металлических объектов. В то же время темные области изображения мало контрастны и присутствующие в них объекты малозаметны.

Таким образом, с учетом мультипликативной природы шума на радарных изображениях для яркостной нормализации изображений этого типа следует использовать нелинейные преобразования, в частности логарифмического типа. В этом случае значение яркости может быть представлено в виде суммы собственно отраженного сигнала и шумовой составляющей.

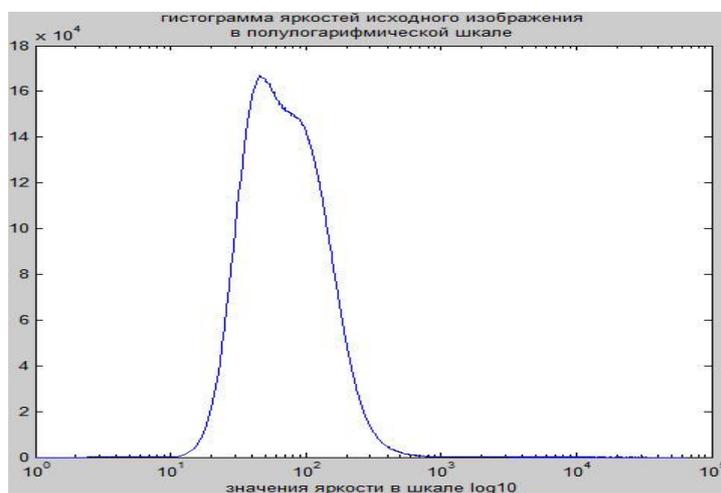


Рис. 1. Гистограмма яркостей фрагмента 5000×5000 пикселей радарного изображения в полулогарифмической шкале  $\log_{10}$

Для нелинейного переквантования яркостей в диапазон [0–255] были исследованы различные варианты преобразования значений яркости. Опишем основные из них:

1. Преобразование яркости согласно функции  $Y_{ij} = \log_2(I_{ij})^2$ . Дает малоконтрастное изображение.
2. Преобразование  $I_{1ij} = I_{ij}^{0.5}$ . Дает темное изображение.
3. Преобразование  $I_{2ij} = \log_2(I_{ij} - T) \times (255 - T)/16$ , где  $T$  – пороговое значение, отделяющее зашумленные спекл-шумом пиксели от остальных. Дает очень светлое изображение.
4. Преобразование  $a \times I_{1ij} + (1 - a) \times I_{2ij}$ , где  $0 < a < 1$ , например  $a = 0,5$ . Дает малоконтрастный результат.
5. Преобразование  $I_{1ij} = I_{ij}^{0.5}$  и линейное растяжение с отбрасыванием 1 % темных и ярких пикселей. Дает приемлемый контраст (рис. 2).

Последнее преобразование было выбрано в качестве основного для яркостной нормализации при отображении радарных изображений на данном этапе.

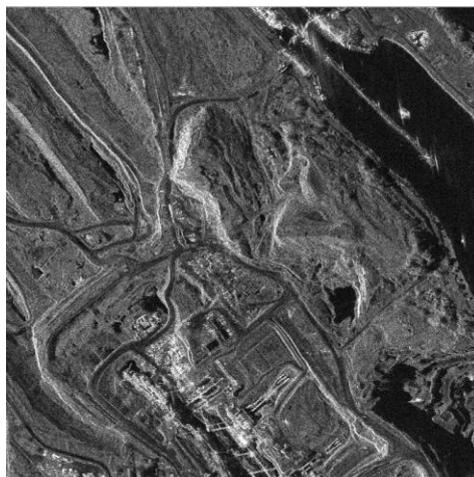


Рис. 2. Шестнадцатибитовое радарное изображение, нелинейно переквантованное в восьмибитовое представление

### 3. Методика выбора фильтра по результатам фильтрации

При обработке радарных изображений во избежание потери информации фильтруются 16-битовые представления изображений. Были исследованы ранговые фильтры, в частности медианный фильтр с разными вариантами окна, фильтры Ли, сигма-фильтр, фильтры Фроста, Куана, Винера, двунаправленный фильтр (bilateral), апостериорный гамма-фильтр и др. [1, 3–11]. Примеры фрагмента, обработанного двумя фильтрами и преобразованного для отображения на мониторе согласно пятому варианту, описанному выше, показаны на рис. 3 и 4. Основная трудность визуальной оценки заключается в том, что результаты могут быть очень похожи. Невозможно определить, какой фильтр лучше уменьшает спекл-шум.



Рис. 3. Результат медианной фильтрации в окне  $3 \times 3$

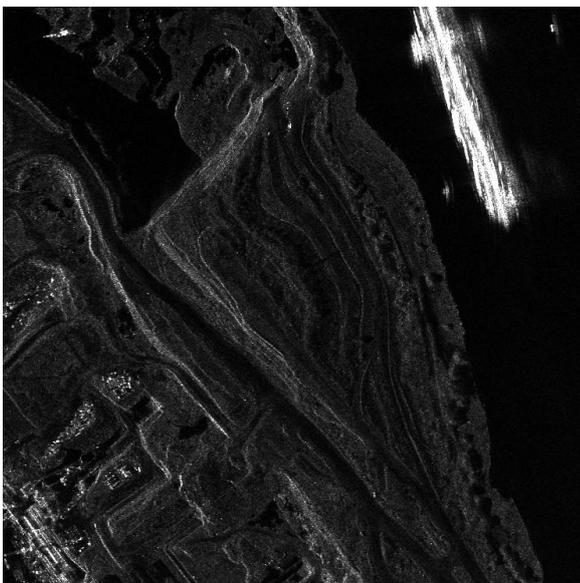


Рис. 4. Результат сглаживания фильтром Винера  $3 \times 3$

В результате анализа литературы [1–11] по фильтрации изображений с синтезированной апертурой выбран рекомендуемый для сравнения результатов фильтрации параметр ENL (equal number of looks) – эквивалентное число наблюдений [12]. Этот параметр рекомендуется

вычислять на однородных участках земной поверхности, таких как поля, леса и т. п. Параметр равен отношению квадрата среднего значения к дисперсии или стандартному отклонению значений яркости пикселей. Основная проблема, связанная с применением этого параметра, состоит в том, что в литературе не описаны методы автоматического определения однородных участков для вычисления ENL.

Автором были исследованы различные варианты автоматического вычисления параметра ENL. Наиболее перспективным оказался вариант вычисления в окне фиксированного размера, который можно определить как функцию от разрешения снимка. На рис. 5 видно, что области воды наиболее однородны (выглядят наиболее темными на рис. 5, а), они дают наибольшие значения параметра ENL (выглядят наиболее светлыми на рис. 5, б). Поэтому они не могут служить в качестве однородных областей для вычисления ENL. Аналогично области с наибольшими значениями на исходном изображении (наиболее светлые на рис. 5, б) имеют меньшие значения параметра ENL (темные участки на рис. 5, б). Для представленного фрагмента максимальное значение ENL равно 98,3040, минимальное – 0,7912, а среднее – 40,0464.

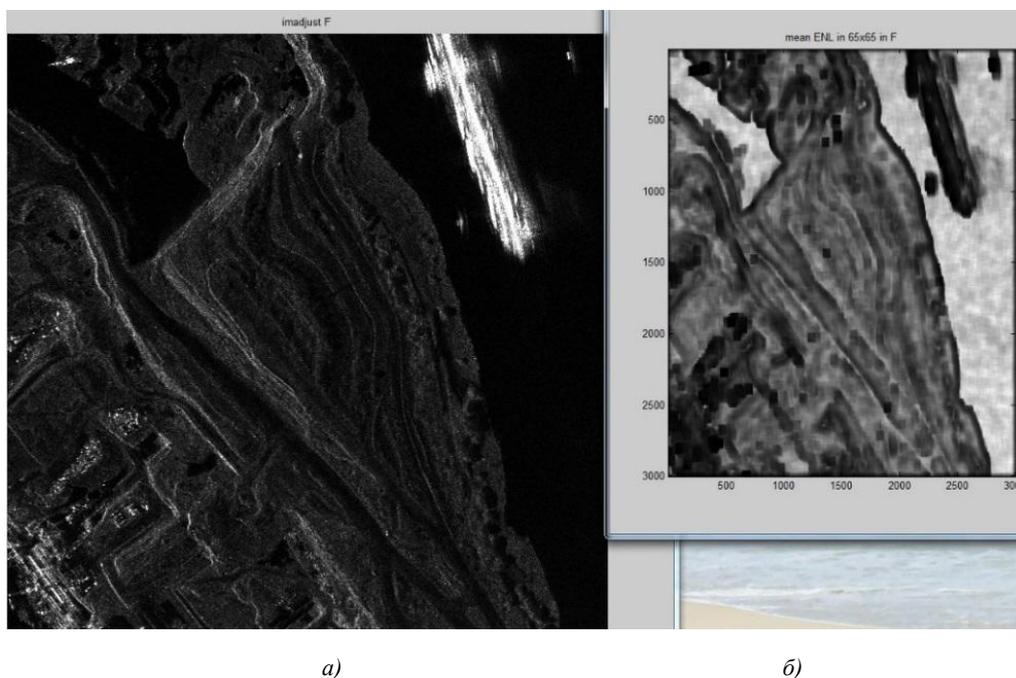


Рис. 5. Фрагмент (3000×3000 пикселей) исходного изображения (а); карта значений параметра ENL, вычисленного в скользящем окне 65×65 пикселей (б)

В результате анализа различных вариантов вычисления параметра ENL предложено использовать медианное значение среди всех, вычисленных для обрабатываемого изображения в скользящем окне определенного размера, после чего определять координаты центра окна, соответствующего этому значению. Далее найденный квадратный фрагмент используется для сравнения результатов фильтрации различными функциями: чем выше значение ENL после фильтрации, тем качественнее результат обработки.

Для оценки результатов фильтрации изображения на рис. 5, а выбраны четыре квадратные области, координаты их центров представлены в табл. 1. Эти области имеют одинаковые значения параметра ENL, равные медианному, поскольку вычисляются в формате с плавающей точкой.

Таблица 1

Участок	ENL1	ENL2	ENL3	ENL4
у	753	2291	2587	1049
х	1071	1079	2437	2655

Таблица 2

Значения ENL в отобранных областях после применения разных фильтров

Фильтр	max(ENL)	min(ENL)	med(ENL)	ENL <sub>1</sub>	ENL <sub>2</sub>	ENL <sub>3</sub>	ENL <sub>4</sub>
Исходное изобр.	17,1670	0,0488	5,8312	5,8312	5,8312	5,8312	5,8312
Ли	38,8634	0,0673	8,8848	8,1970	7,9533	7,2671	10,3037
Сигма-Ли	17,1670	0,0500	5,8315	5,1169	5,7429	5,4332	6,9475
Фроста	85,3420	0,0831	12,6353	12,3868	10,5688	9,0764	14,1049
Куана	358,8283	0,0874	<b>24,9837</b>	<b>26,6505</b>	<b>19,119</b>	<b>12,5543</b>	<b>23,770</b>
Медианный, 3×3	32,5624	0,0623	7,8927	7,4157	7,3355	6,6998	9,1120
Винера, 3×3	38,7188	0,0492	8,7860	7,6425	7,9398	7,2622	10,3062
Bilateral	369,3838	0,1545	<b>24,4974</b>	<b>25,7966</b>	<b>18,5332</b>	<b>12,3430</b>	<b>23,3042</b>
L0 smoothing	2,8431×10 <sup>7</sup>	0,0492	6,5068	5,2576	6,1008	6,5113	8,0718

Анализ табл. 2 показывает, что улучшенный фильтр Ли (названный в литературе сигма-Ли) практически не меняет значения ENL после фильтрации, а фильтры Куана и bilateral имеют наибольшие среди других фильтров показатели параметра ENL, поэтому они являются лучшими при фильтрации данного изображения.

### Заключение

Описана новая методика автоматического выбора фильтра и его параметров для уменьшения влияния спекл-шума на радарных изображениях с синтезированной апертурой. С ее помощью можно выбирать фильтры, которые лучше других сгладят спекл-шум на обрабатываемом изображении. Методика заключается в вычислении параметра ENL в скользящем окне фиксированного размера для всего исходного изображения, поиске медианного значения ENL, определении участков изображения, соответствующего найденным медианным значениям, применении нескольких вариантов фильтрации к исходному изображению и выборе тех фильтров, которые дают максимальные значения ENL после обработки.

Для визуального контроля результатов предлагается вариант нелинейного переэквантования яркостей радарных изображений, описываемых большим диапазоном значений: от 0 до  $2^{16}-1$ .

### Список литературы

1. Радиолокационные системы землеобзора космического пространства / под ред. В.С. Вербы. – М.: Радиотехника, 2010. – 680 с.
2. Goodman, J.W. Some Fundamental Properties of Speckle / J.W. Goodman // Journal of the Optical Society of America. – 1976. – Vol. 66, № 11. – P. 1145–1150.
3. Lee, J.S. Digital Image Enhancement and Noise Filtering by Use of Local Statistics / J.S. Lee // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 1980. – Vol. 2. – P. 165–168.
4. Improved sigma filter for speckle filtering of SAR imagery / J.S. Lee [et al.] // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2009. – Vol. 47, № 1. – P. 202–213.
5. Frost, V.S. A Model for Radar Images and Its Application to Adaptive Digital Filtering of Multiplicative Noise / V.S. Frost // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 1982. – Vol. 4, № 2. – P. 157–166.
6. Adaptive Noise Smoothing Filter for Images with Signal-Dependent Noise / D.T. Kuan [et al.] // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 1985. – Vol. 7. – P. 165–177.
7. Azimi-Sadjadi, M.R. Two-Dimensional Adaptive Block Kalman Filtering of SAR Imagery / M.R. Azimi-Sadjadi, S. Bannour // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 1991. – Vol. 29. – P. 742–753.
8. Gagnon, L. Speckle Filtering of SAR Images – A Comparative Study Between Complex-Wavelet-Based and Standard Filters / L. Gagnon, A. Jouan // SPIE Proc. – 1997. – Vol. 3169. – P. 80–91.

9. Speckle Noise Reduction in SAR Imagery Using a Local Adaptive Median Filter / F.J. Qiu [et al.] // *GIScience and Remote Sensing*. – 2004. – Vol. 41, № 3. – P. 244–266.
10. Xiao, J. A detail-preserving and flexible adaptive filter for speckle suppression in SAR imagery / J. Xiao, J. Li, A. Moody // *International Journal of Remote Sensing*. – 2003. – Vol. 24, № 12. – P. 2451–2465.
11. Tomasi, C. Bilateral filtering for gray and color images / C. Tomasi, R. Manduchi // *Proc. 6<sup>th</sup> Intern. Conf. on Computer Vision*. – Bombay, 1998. – P. 839–846.
12. Bruniquel, J. Multi-variate optimal speckle reduction in SAR imagery / J. Bruniquel, A. Lopes // *International Journal of Remote Sensing*. – 1997. – Vol. 18, № 3. – P. 603–627.

Поступила 02.03.2015

*Объединенный институт проблем  
информатики НАН Беларуси,  
Минск, Сурганова, 6  
e-mail: valerys@newman.bas-net.by*

**V.V. Starovoitov**

### **METHOD OF FILTER SELECTION FOR SPECLE-NOISE SMOOTHING IN SAR IMAGES**

A method for comparison of different SAR image filtration techniques is presented. It allows selecting the filters with better speckle noise smoothing effect. Unlike the known approaches, the presented method is based on *ENL* parameter calculation for automatically selected areas.